

광 기록 시스템을 위한 부분 응답 신호

이주현, 이재진
동국대학교 전자공학과

The Partial Response Signals for Optical Recording System

Joo Hyun Lee, Jae Jin Lee
Dept. of Electronic Eng., Dongguk University

xmas@dgu.edu, zlee@dgu.edu

요 약

본 논문에서는 고밀도 광 기록 시스템에서 코드율이 2/3인 (1,7) 코드를 사용하여 부분 응답의 목표를 다양하게 변화시켜 여러 가지 목표 응답에 대해 잡음의 대부분을 차지하는 지터(jitter) 성분만을 고려했을 때와 이에 추가적인 백색잡음(AWGN)만을 고려하였을 경우의 성능을 각각 비교, 분석하였다. 또한, 이 실험 결과를 토대로 고밀도 광 기록 채널에 적용시킬 수 있는 가능한 부분 응답들을 조사하였고, 그 결과 PR(6,6,8,4,3) ML 코드가 고밀도 기록 시스템에서 좋은 데이터 검출 능력을 나타냄을 보였다.

I. 서 론

자기 채널의 경우, 저장 밀도가 증가함에 따라 디지털 자기 기록을 위한 신호 처리 방법으로 부분 응답(partial response, PR) 부호화가 제안된 후, 이에 따라 부분 응답 기술이 상업적인 자기 기록 제품에 실제적으로 적용, 구현되어 왔다[1].

자기 기록의 경우와 마찬가지로, 광 기록 매체에서도 부분 응답 등화(PR equalization), 트렐리스(trellis) 코드 및 비터비(Viterbi) 검출기 등과 같은 신호 처리 기법은 기록 밀도를 증가시키기 위한 방법으로서 매력을 갖게 되었다. PR 등화 및 검출 기법은 광 채널에 적용될 수 있을 뿐만 아니라, 자기 기록 시스템에서와 마찬가지로 그 기능을 수행함에 있어 여러 장점을 지니고 있다[2].

현재의 광 기록 시스템에서는 기존의 자기 시스템에서 사용되는 간단하고 저렴한 런-길이 제한(run-length limited, RLL) 코드 및 피크(peak) 검출기 중심의 신호 처리 기법만이 사용되고 있는데, 커다란 성능 변화를 가져오지는 않았다.

고밀도 기록 시스템에서 가장 주목받는 신호처리 방법으로는 부분 응답 시스템에 비터비 검출기를 결합한 PRML 검출 시스템이 있다.

본 논문에서는 PR에 대한 목표(target) 응답 다항식의 각각의 계수값을 변화시켜 여러 가지 다른 목표 응답에 대한 성능을 시뮬레이션을 통해 비교, 분석하여 고밀도의 광 기록 시스템에서 좀더 적합한 목표 응답을 제안하였는데, 이때 고밀도 광 기록 채널에서 잡음의 대부분을 차지하는 지터(jitter) 성분과 자기 기록 시스템에서와 같이 AWGN만을 고려했을 때의 성능을 각각 비교, 분석하였다.

본 논문 다음과 같이 구성하였다. 먼저 II절에서는 광 기록 시스템의 전체 구조에 대해 간략히 설명하였고, III장에서는 고려한 잡음의 종류에 따른 각각에 대한 비트 오류율에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고, 우수한 부분 응답 신호를 제안하였으며, IV장에서 결론을 내렸다.

II. 시스템 모델 (System Model)

광 기록 및 검출 시스템에 대한 일반적인 모델은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

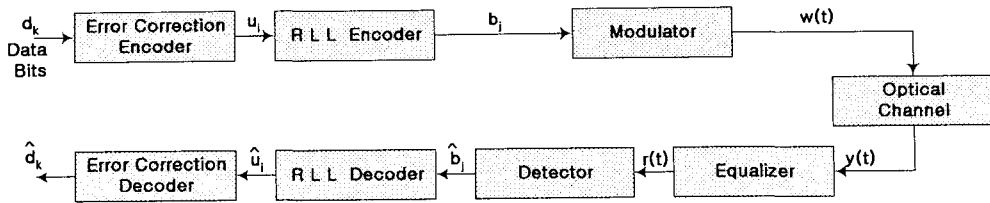


그림 1. 광 기록 및 검출 시스템 모델

1. (1,7) RLL 코드

오류 정정 부호기(error correction encoder)를 통과한 정보 비트 시퀀스는 RLL 부호기의 입력으로 들어가게 된다.

RLL 코드는 기록 밀도가 증가하면서, 인접 심벌 간섭(intersymbol interference) 배제 및 타이밍 복구(timing recovery)를 위해 사용되고 있다[2]. 이때, 본 실험에서는 표 1과 같이 연속적인 1 사이에 0의 런-길이(transition run-length)가 1개 이상에서 7개 이하로 제한을 받는 (1,7) RLL 코드를 고밀도 광 시스템에 대해 적용하였다.

RLL 부호기를 통과한 데이터 스트림은 변조된 후 $w(t)$, 광 기록 채널에 기록되게 되고, 재생시에는 PRML 검출기로부터 데이터를 받아 복호된다.

2. 비선형 광 채널에 대한 모델링

천이(transition) 지터는 기록 천이가 원래의 위치에서 시프트 되는 비선형 비트 시프트(nonlinear bit-shifts)와 유사하다. 그러나, 지터의 경우 데이터 시퀀스와 독립적이면서 불규칙(random)하게 발생한다.

$y(t)$ 를 재생 신호라 할 경우 다음과 같다.

$$y(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k g(t - (k + \Delta_k)T) \quad (1)$$

이때,

$$b_k = a_k - a_{k-1} \in \{-2, 0, 2\} : \text{천이 시퀀스}$$

$$g(t) : \text{천이 응답}$$

$$a_k \in \{-1, 1\} : \text{기록된 데이터 시퀀스}$$

이다.

표 1. (1,7) 코드 테이블

Data	Code	Data	Code
00	101	00.00	101.000
01	100	00.01	100.000
10	001	10.00	001.000
11	010	10.01	010.000

(a) 기본 테이블

(b) 보조 테이블

심벌 간격 T 에 대해 정규화된 변위 Δ_k 는 a_k 와 b_k 에 대해 독립적인 불규칙 변수라 할 때, $g(t)$ 가 충분히 대역제한 되어 있고, $|\Delta_k|$ 가 매우 작을 경우, 모든 t 에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(t + \Delta T) \approx g(t) + \Delta T g'(t) \quad (2)$$

이 경우, 재생 신호 $y(t)$ 는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$y(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k g(t - kT) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k g'(t - kT) \quad (3)$$

여기서,

$$d_k = -b_k \Delta_k : \text{불규칙 잡음 시퀀스}$$

$$g'(t) = T g'(t) : g(t) \text{의 정규화된 미분}$$

$$z(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k g'(t - kT) : \text{부가적 방해 성분}$$

이다.

위 식에 대해 도식적으로 표현하면 그림 2와 같다[3].

3. 부분 응답

채널의 기록 밀도가 증가하면서, 현재 데이터 검출 방법으로 PRML 방식을 사용한다.

광 채널을 사용하는 경우, PRML 검출 방식을 이용한 목표 응답(target response)에 대해 일반적인 4차의 전달함수 다항식을 $h_0 + h_1D + h_2D^2 + h_3D^3 + h_4D^4$ 으로 표현할 수 있다. 여기서, 연산자 D 는 심벌 간격 T_s 에 대한 지연(delay)을 의미한다.

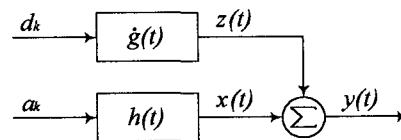
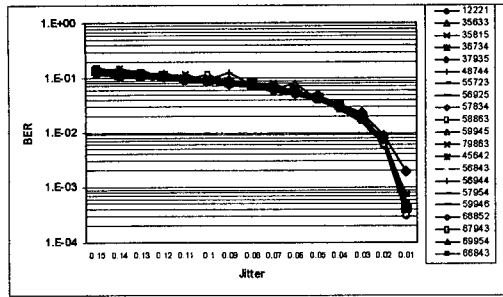
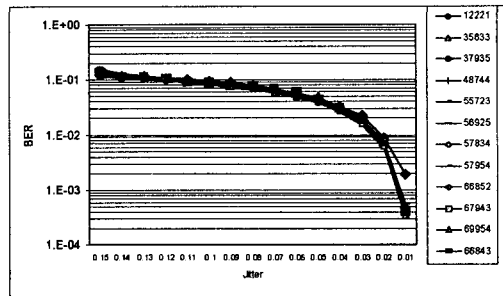


그림 2. 천이 지터가 부가된 채널 모델

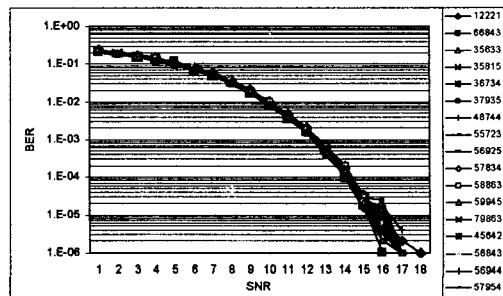


(a) 1%~5% 사이에서 (1,2,2,2,1)보다 우수한 성능을 나타내는 목표응답.

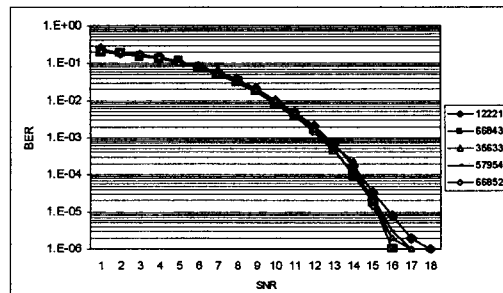


(b) (a)의 결과값 중 1%~15%까지 전체적으로 우수한 성능을 나타내는 목표응답.

그림 3. 지터 잡음만을 고려한 경우의 BER 곡선



(a) SNR=17dB에서 (1,2,2,2,1)보다 우수한 목표 응답.



(b) (a)의 결과값 중 SNR이 1~17dB 사이에서 다항식 (1,2,2,2,1)보다 좋은 성능을 나타내는 목표응답.

그림 4. AWGN만을 고려한 경우의 BER 곡선

PRML 방식은 비터비 알고리즘을 바탕으로 구현되는데, 구현상 복잡성(complexity)이 크지만 다른 데이터 검출 방법보다 좋은 성능을 내기 때문에 가장 널리 이용되고 있다. 이때, PRML 검출기는 LMS(least mean square) 선형 등화기와 결합하여 구현하였다.

III. 실험 결과 (BER 성능)

광 채널에 대한 4차 목표 다항식 $h_0 + h_1D + h_2D^2 + h_3D^3 + h_4D^4$ 에서 볼 때, 이와 같이 수많은 가능한 목표 응답 중에 기준 다항식으로 (1,2,2,2,1)을 설정하여 고밀도 광 채널에서 어떠한 다항식이 좀더 좋은 성능을 나타내는지를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 현재까지 제시된 3차 부분 응답 다항식으로는 (1,1,1,1)이 있으나[2], 4차에 대한 다항식으로는 아직까지 제시되지 않았기에 PR(1,2,2,2,1)ML을 기준 다항식으로 삼았다. 이때, 채널의 밀도는 4.6을 기준으로 하였다.

1. 지터 잡음만을 고려한 결과

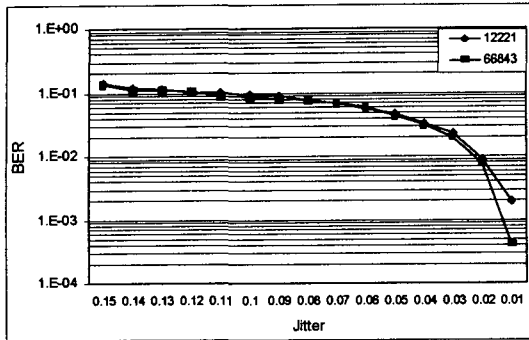
광 채널에서는 지터 잡음이 잡음의 대부분을 차지하는 것으로 알려져 있는데, 이때 지터 잡음을 1%(0.01)에서 15%(0.15)의 비율로 첨가하여 BER을 조사하였다. 우선, 몇가지 목표 다항식을 통해 BER을 조사한 결과, 6% 이상에서는 BER 값이 거의 비슷하게 나타남을 확인하였다. 따라서, 시뮬레이션은 먼저 1%~5% 사이에서 가능한 모든 PR 목표값에 대해 시뮬레이션을 한 후, 기준 다항식으로 삼은 PR(1,2,2,2,1)ML보다 성능이 우수한 목표 응답에 대해 지터 비율이 1%~15%인 것에 대해 시뮬레이션을 하였으며, 이에 대한 BER 특성을 그림 3(a)에 나타내었다. 이때, 발생시킨 데이터 수는 10^6 비트였으며, 데이터의 불규칙성을 고려해 각 다항식에 대해 시뮬레이션을 두 번씩 수행하였다.

결과 중에서 전체적으로 PR(1,2,2,2,1)ML보다 성능이 우수한 목표 응답이 10가지로 압축되었다(그림 3(b)).

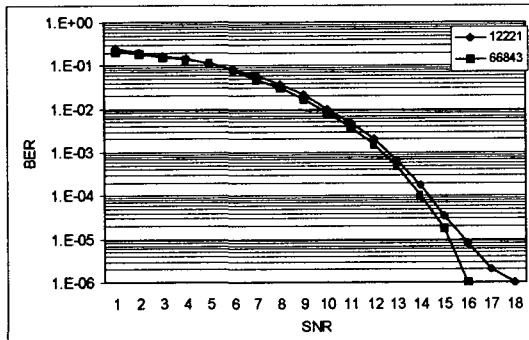
이때 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 천이 지터의 영향으로 인해 0.01의 경우에서도 비트 오류율이 약 4×10^{-3} (SNR \approx 13dB)으로 나타났다.

2. 추가적인 백색 잡음만을 고려한 결과

지터 잡음이 섞인 고밀도 광 채널 대신에, 자기 채널에서와 마찬가지로 선형 AWGN을 사용하여 가능한 모든 PR 목표 값에 대해 위의 실험과 동일하게 두 번씩 시뮬레이션을 한 결과, 그림 4(a)에서와 같이 밀도 4.6에서 16개의 목표 응답이 100만 비트의 데이터 중에서 SNR이 17dB인 지점에서 에러가 발생하지 않았다. 위의 실험 결과와 비교해 볼 때, AWGN 상에서의 결과



(a) 지터 잡음 채널의 경우.



(b) AWGN 채널의 경우.

그림 5. 지터 잡음 및 AWGN 채널 모두에서 우수한 성능을 나타내는 다항식 (6,6,8,4,3)에 대한 곡선

값이 지터 잡음 채널 상에서 나온 결과 값과 반드시 같지 않음을 알 수가 있다. 이 중에서 SNR이 1~17dB 사이에서 PR(1,2,2,2,1)ML인 경우보다 전체적으로 우수한 성능을 나타내는 목표 응답에 대해 그림 4(b)에 나타내었다.

3. 지터 잡음 및 AWGN 채널에서 모두 우수한 성능을 나타내는 목표 응답

비선형 지터 잡음 채널에서 부분 응답 목표 다항식 (1,2,2,2,1)보다 전체적으로 우수한 성능을 나타내면서, 선형 AWGN 채널상에서 SNR 대비 BER 곡선이 (1,2,2,2,1)보다 좋은 성능을 나타내는 목표 다항식을 찾아낸 결과, 그림 5와 같이 (6,6,8,4,3) 목표 응답을 찾아내었다.

이러한 PR(6,6,8,4,3)ML 코드는 비선형 잡음 채널에서 지터 비율이 1%인 경우에서 약 1dB의 성능 개선을 볼 수 있고, AWGN 채널의 경우에도 SNR이 16dB인 경우에서 약 1dB의 데이터 검출 능력의 개선을 가져올 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고밀도 광 기록 시스템에서 (1,7) 코드에 대한 다양한 부분 응답의 목표 다항식에 대해 비선형 지터 잡음과 선형의 AWGN 각각에 따른 BER 특성을 비교, 분석하여 데이터 검출 능력을 조사하였고, 그 결과 PR(6,6,8,4,3)ML 검출 방법이 두 가지 채널 모두에서 우수한 성능을 나타냄을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 보였다.

참 고 문 헌

- [1] R. Cideciyan, F. Dolivo, R. Hermann, W. Hirt, and W. Schott, "A PRML system for digital magnetic recording," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, pp.38-56, Jan. 1992.
- [2] Steven W. McLaughlin, "Shedding Light on the Future of SP for Optical Recording," IEEE Signal Processing Magazine, pp.83-94, July 1998.
- [3] Jan W.M. Bergmans, "Digital Baseband Transmission and Recording," Kluwer Academic Publishers, 1996.